



Доктор геолого-
минералогических
наук
В. Г. ТРИФОНОВ

ЖИВАЯ ТЕКТОНИКА ГОЛОЦЕНА

Эпоха голоцена, охватывающая последние 10 тыс. лет,— время становления и развития человеческих цивилизаций. Восемь—десять тысяч лет назад возникли первые поселения городского типа, тогда же появились зачатки земледелия и скотоводства, и человек стал менее зависим от природы. По мере роста населения и его концентрации в культурных оазисах возросли социальные и экономические последствия катастрофических природных явлений, поэтому изучение тектонической жизни Земли в наше время стало серьезной практической задачей. С ее решением непосредственно связано определение сейсмического риска и опасности других стихийных геологических бедствий.

Особенности проявления голоценовой тектоники

Изучение тектоники голоцена позволяет выявлять тектонические закономерности, недоступные или менее доступные для исследования в структурах геологического прошлого. По деформациям рельефа удается с высокой точностью определять величины тектонических перемещений, как вертикальных, так и горизонтальных. Пользуясь радиоуглеродными датировками и отчасти археологическими и историческими свидетельствами, мы имеем возможность с недоступной для геологического прошлого точностью устанавливать время тектонических подвижек, неравномерности этих движений и их средние скорости. А самое важное, проявления голоценовой тектоники видны на поверхности всей планеты в своих истинных формах и пространственных соотношениях, не искаженных последующими смещениями и перестройками, что позволяет исследовать глобальные закономерности тектогенеза.

Существенное значение имеет и еще одна особенность голоценовой тектоники. Из-за малого эрозионного среза мы лишены возможности непосредственно проследить голоценовые структуры, выделенные на поверхности, глубже первых сотен метров, а чаще лишь десятков метров. Однако сейсмические проявления современного тектогенеза, характеризующие активность Земли на глубинах в десятки, а местами сотни кило-



метров, позволяют по параметрам землетрясений строить более или менее обоснованные предположения о реологических свойствах среды и механизме деформаций. Кроме того, такие геофизические характеристики, как скорости распространения сейсмических волн или тепловой поток, связаны с новейшими тектоническими событиями и в большей степени отражают современное состояние геологической среды, чем древнее. Все это позволяет перейти к регистрации голоценовых тектонических процессов во всем объеме литосферы и строить модель ее современного тектонического развития, которая важна для понимания структурных соотношений и геодинамики отдаленного прошлого.

В процессе геологосъемочных работ и даже специального изучения четвертичной геологии исследователи долгое время обращали мало внимания и в конечном счете недооценивали проявления голоценовой тектоники. В конце прошлого — начале нынешнего века И. В. Мушкетов, К. И. Богданович и некоторые другие геологи в нашей стране и за рубежом дали научные описания разрывов и трещин, возникших при современных катастрофических землетрясениях. Эти нарушения отличались от разрывов, регистрируемых в древних породах, лишь меньшими амплитудами смещений и тем, что такие смещения охватывали не только горные породы, но и развитые на них формы рельефа. Стало очевидным, что тектоническая жизнь Земли не замерла к концу четвертичного периода, и нужно было научиться видеть ее следы даже в тех случаях, когда отсутствовали исторические свидетельства о катастрофических событиях.

Главным признаком голоценовых тектонических движений являются молодые деформации рельефа. Для их выявления сначала на мелкомасштабных космических изображениях оконтуриваются зоны четвертичной тектонической активности, в которых наиболее вероятны проявления голоценовой тектоники¹. Затем на детальных аэрокосмических снимках этих зон выделяются молодые разрывы и складчатые формы (рис. 1),

¹ Трифонов В. Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983.

причем нередко удастся определить их морфолого-кинематические характеристики. На выбранных по снимкам участках проводится наземное изучение направления, амплитуд и распространения смещений, наиболее часто проявленных деформациями речных и овражных долин (искривления, изменения очертаний, величин современных врезов и продольных уклонов, поведение террас, распределение и фациальные особенности осадков, перестройки гидросети и т. д.). С целью определения времени подвижек устанавливается возраст нарушенных отложений и форм рельефа как с помощью радиоуглеродного опробования или археологических данных, так и путем корреляции с датированными образованиями.

Особая проблема — соотношения голоценовых тектонических нарушений, наблюдаемых на поверхности Земли, с деформациями глубинных горизонтов земной коры и литосферы в целом. Сопоставляя голоценовые тектонические нарушения с элементами новейшей геологической структуры, сформированной в течение последних миллионов лет, с данными сейсмологии и некоторыми геофизическими полями, мы можем разделить голоценовые структуры на три группы.

Одна из них — крупные разломы и флексурные изгибы, характеризующиеся ступенеобразным перегибом слоев горных пород. С ними связаны голоценовые смещения и деформации рельефа, они проявляются в сейсмических данных или служат границами областей с разными геофизическими параметрами, что позволяет проследить такие структуры на значительные глубины земной коры. Типичный пример — Главный Копетдагский разлом на юге Туркмении.

Другие голоценовые тектонические нарушения разрывного или складчатого типа также наследуют подобные им более ранние структуры, по, судя по структурно-геологическим построениям, сейсмическим и иным геофизическим данным, они не распространяются глубже осадочного чехла или верхней части гранитометаморфического фундамента. Таковы многие голоценовые антиклинальные поднятия Западной Туркмении, отдельные продольные активные разломы и складки Юго-Восточного Кавказа, сбросы Провинции Бассейнов и Хребтов на западе Северной Америки.

Наконец, выделяются голоценовые нарушения, не совпадающие по направлению и расположению с главными элементами неотектонической структуры земной поверхности. Это — зоны мелких разрывов и трещин или, напротив, достаточно протяженные и широкие, но пологие ступени поверхности, то есть зоны ее относительного поднятия или опускания. На юго-востоке Кавказа, например, небольшие разрывы северо-восточного простирания сконцентрированы в зоне линейных элементов того же простирания, прослеженных на космических снимках от Пальмирской системы складок в Сирии через северо-западное побережье озера Урмия до города Сумгаит на Каспийском море. Выявленным линейным элементам ландшафта соответствуют в разных местах области резкого изменения гравиметрического поля, гипсометрического положения поверхности фундамента или границы Конрада, разделяющей «гранитный» и «базальтовый» слои земной коры, а также участки аномального погасания сейсмических волн и концентрации очагов землетрясений. Все это дает основание рассматривать выявленные линейные элементы ландшафта как отражение на земной поверхности тектонической зоны, активной сейчас на глубинах 10—25 км и не совпадающей по направлению с большинством менее глубоких активных структур осадочного чехла восточной части Кавказа².

² Макаров В. И., Трифонов В. Г., Шукин Ю. К. Отражение глубинной структуры складчатых областей на космических снимках // Геотектоника. 1974 № 3. С. 114—132.

Таким образом, деформации и смещения на разных уровнях литосферы могут происходить автономно, хотя и проявляются в ослабленной мере на соседних уровнях — в данном случае структуры, развивающиеся на глубинах 10—25 км, находят слабое отражение в деформациях поверхности. Эти-то следы в сочетании с геофизическими данными и делают возможным изучение современной глубинной тектоники и сопоставление деформаций, развивающихся сейчас на разных уровнях литосферы³.

Характер голоценовых перемещений

Одни из самых активных в голоцене — разломы Срединной Азии (рис. 2), причем горные массы на этой обширной территории имеют однонаправленное относительное движение. Так, на западных и северо-западных флангах Аравии и Индостано-Памира выявлены левые сдвиги, то есть разломы, вдоль которых относительные горизонтальные движения горных масс происходят против часовой стрелки, а на северо-восточных флангах этих областей — правые сдвиги с горизонтальными смещениями горных масс по часовой стрелке. Такое расположение сдвигов указывает на сближение Аравии и Индостано-Памира с северными частями Евразии. Широтные сдвиги Северной Анатолии, Ирана, Афганистана и Таджикской депрессии, Тибета, Куньлуня и Алтынтага (КНР) отражают процессы отжимания горных масс в стороны от движущихся к северу Аравии и Индостано-Памира.

В Срединной Азии движения крупных объемов горных пород наблюдаются в подвижных поясах шириной в сотни километров. Образование таких поясов невозможно при взаимодействии недеформируемых жестких плит, поскольку краевые области взаимодействующих горных масс испытывают значительные деформации и внутренние смещения. Площади деформированных краевых областей значительны. Например, Памиро-Гималайская область интенсивных голоценовых деформаций соизмерима с относительно недеформированной частью Индостанского полуострова.

Большинство голоценовых разломов Срединной Азии простирается вдоль границ хребтов и соседних впадин. Очевидно (и это подтвердило полевое изучение), по разломам происходят вертикальные движения, поддерживающие относительный рост гор. Исследование голоценовой тектоники выявило и другое важное обстоятельство: многие из пограничных разломов имеют сдвиговую компоненту смещений, которая иногда соизмерима, а чаще больше вертикальной компоненты. Рассчитанные скорости позднечетвертичных сдвиговых перемещений измеряются миллиметрами, а порою превосходят сантиметр в год. Пока нет надежного способа измерять древние горизонтальные перемещения в тех случаях, когда они, подобно продольным голоценовым сдвигам, простираются вдоль границ геологических тел и структурных зон. Для голоценовых разрывов это удалось сделать благодаря специфике метода определения — использованию смещений форм рельефа. Оказалось, что продольные сдвиги преобладают в кинематике форм рельефа. Это, возможно, объясняется энергетической экономичностью сдвиговых перемещений, при которых не преодолевается сила тяжести.

Площади, занятые преимущественно складчато-надвиговыми голоценовыми нарушениями или сбросово-раздвиговыми, невелики. Любопытна и еще одна особенность: вертикальная компонента смещений по большинству сдвигов Азии оказывается взбросовой независимо от простирания

³ Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов. М.: Наука, 1982.

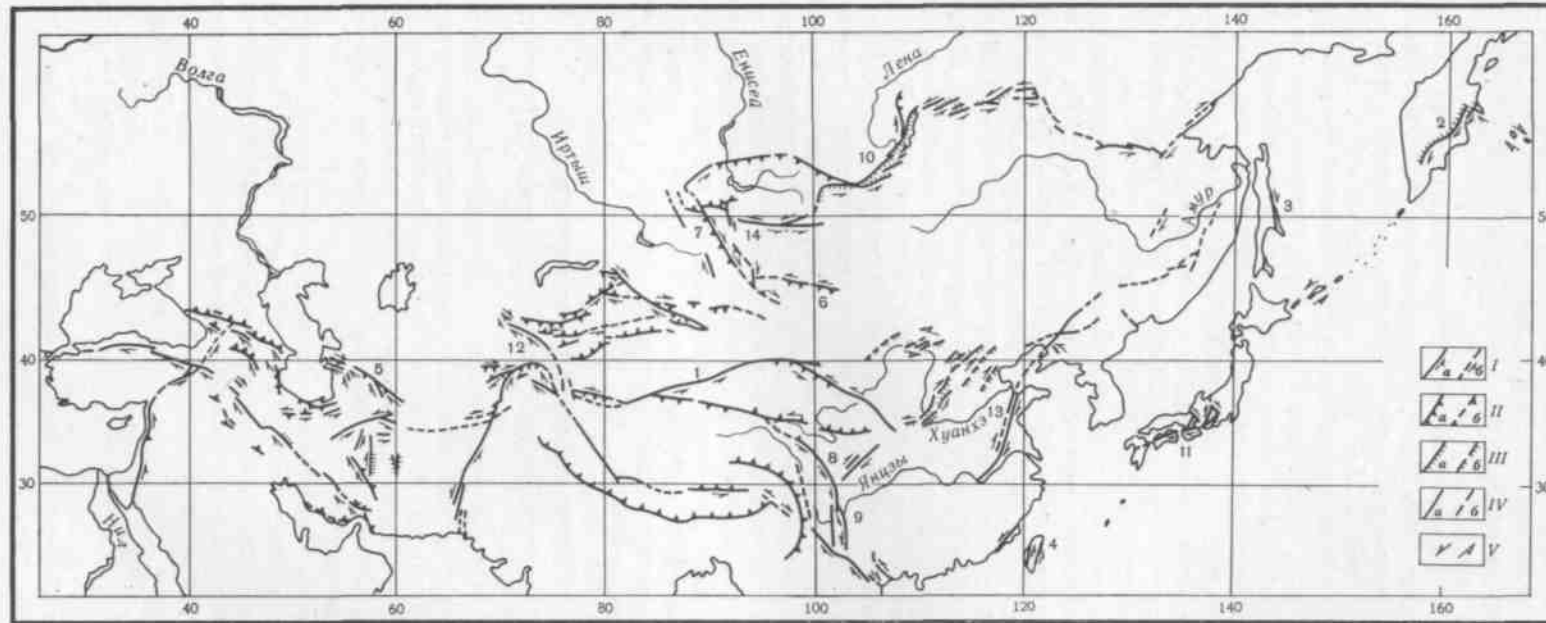


Рис. 2. Разломы Срединной Азии, активные в голоцене (карту составил В. Г. Трифонов по опубликованным данным К. Р. Аллена, М. Берберяна, Н. У. Веллмана, Дин Гуй-Ю, А. И. Кожурина, К. Г. Леви, Н. В. Лукиной, В. И. Макарова, А. А. Никонова, Н. Н. Павони, К. Ху-зита, С. И. Шермана, С. С. Шульца-мл. и личным наблюдениям)

Активные разломы (а — достоверные, б — предполагаемые): I — сдвиги, II — надвиги и взбросы, III — сбросы, IV — с невыясненным направлением смещений, V — зоны сдвиговых деформаций; 1 — Алтынтагский разлом, 2 — Восточный фас Центрально-Камчатской депрессии, 3 — Восточно-Сахалинский разлом, 4 — Восточно-Тайваньский разлом, 5 — Главный Конгтагский разлом, 6 — Долинооверский разлом, 7 — Кобдинский разлом, 8 — разлом Кеншуй, 9 — разлом Кеночан, 10 — Приморский разлом Байкала, 11 — Срединная линия Японии, 12 — Таласо-Ферганский разлом, 13 — разлом Таилу, 14 — Хангайский разлом

сдвигов. Сбросовой она является лишь в приморских районах востока Азии, в Байкальской рифтовой системе, районе Лутского массива Ирана и локально в некоторых других местах.

Выделяются пояса преимущественного распространения левых или правых сдвигов. Так, разломы с правосдвиговой компонентой смещений доминируют на Северном Тянь-Шане, в Джунгарии, Монгольском Алтае. Другой пояс правых сдвигов тянется от Восточного Китая (разлом Танлу) до Камчатки (Восточный фас Центрально-Камчатской депрессии). Между этими двумя поясами расположены зоны левых сдвигов Прибайкалья и Станового нагорья, Монголии, Китая. Простираения сдвигов в пределах поясов существенно варьируют. У правых сдвигов западного пояса они изменяются от западно-северо-западного, почти широтного на южном краю Джунгарской впадины до северо-северо-западного в Монгольском Алтае. Еще более изменчивы простираения в поясе левых сдвигов Южного Китая: от восточно-северо-восточного у Алтынтагского разлома до северо-северо-западного у разломов Ксяншуй и Ксяочан.

Преимущественно сдвиговый характер голоценовых перемещений присущ не только внутриконтинентальным подвижным поясам. На активных окраинах и в островных дугах периферии Тихого океана продольные разломы также нередко имеют сдвиговую компоненту перемещений, превосходящую сбросовую или надвиговую⁴. Правосдвиговые смещения характерны для Восточного фаса Центрально-Камчатской депрессии, Восточно-Сахалинского разлома, Срединной линии Японии, Альпийского сдвига Новой Зеландии, Атакамского разлома Анд, разлома Сан-Андреас на западе Северной Америки, разломов Аляски и Западных Алеут. Продольные левые сдвиги установлены на Тайване и Филиппинах. Перечисленные области имеют развитую континентальную кору, реже кору переходного типа. Там, где у активной островной дуги кора близка по строению к океанической, сдвиговая компонента движений по продольным разломам уменьшается, сдвиги сменяются пододвиганием океанических масс под островную дугу. Такие процессы наблюдаются в районе дуги Тонга-Кермадек, расположенной на продолжении Альпийского сдвига Новой Зеландии. Вероятно, преобладание сдвиговых перемещений характерно именно для континентальной коры.

Соотношение поверхностных и глубинных голоценовых структур

Среди голоценовых тектонических нарушений земной поверхности встречаются разломы, пронизывающие значительную часть земной коры, разрывы и складки, либо не распространяющиеся ниже верхней части коры, либо, напротив, служащие лишь слабым отражением сильных тектонических движений в нижних ее горизонтах, а иногда и в верхах мантии.

Нередко поверхностные и глубинные активные структуры имеют разное расположение и строение. Так, в верхней части земной коры на западе Северной Америки главной структурой является активный в голоцене правый сдвиг Сан-Андреас северо-северо-западного простираения. По нему массы континентальной коры перемещаются на юго-восток относительно Тихого океана и побережья. Глубже 20 км разлом Сан-Андреас, вероятно, не продолжается. Об этом свидетельствуют и величины теплового потока, нетипичные для структур мантийного заложения, и коровые

⁴ Кожурин А. И., Грифонов В. Г. Молодые сдвиги периферии Тихого океана// Геотектоника. 1982. № 2. С. 3—18.



отношения изотопов выделяющегося по разлому гелия, и тот факт, что граница разноскоростных объемов мантии, в отличие от верхнекоровых геологических тел и структурных зон, пересекает разлом без смещения, и, наконец, выклинивание крутопадающей плоскости разлома глубже 20 км, регистрируемое методом отраженных волн⁵.

Главная система глубинных нарушений на западе Северной Америки, как и разлом Сан-Андреас, начинается от северного окончания Калифорнийского залива. Постепенно удаляясь от Сан-Андреаса на расстояние до 300 км, она протягивается вдоль западного края Провинции Бассейнов и Хребтов и достигает равнины Снейк-Ривер. Эта система, реконструируемая по косвенным геологическим и геофизическим признакам, представляется ступенчатым в плане сочетанием коротких, простирающихся на северо-восток, зон рифтового типа и связывающих их трансформных (сдвиговых) зон северо-западного простирания. Такой набор глубинных структур отличается от верхнекоровых образований Провинции Бассейнов и Хребтов — субмеридиональных поднятий и впадин, которые разделены разломами сбросового типа, сочетающими вертикальную подвижку с растяжением. Несовпадение структурных планов и зон наиболее высоких градиентов скоростей горизонтальных движений в верхнекоровом слое и на глубине приводит к срыву и скольжению горных масс по подошве верхнекорового слоя. В Провинции Бассейнов и Хребтов ей местами соответствует волновод — слой пониженных скоростей сейсмических волн.

Образование таких срывов и дифференцированное движение различных оболочек академик А. В. Пейве назвал тектонической расслоенностью литосферы. Еще отчетливее она выражена на Памире. Изучение новейшей покровно-складчатой структуры и реконструкция тектонического развития региона в течение последних 40 млн. лет приводят к выводу о срыве верхнекорового слоя и его деформировании в значительной мере независимо от движений более глубоких оболочек литосферы (рис. 3). В современной структуре автономность верхнекорового слоя подтверждается пространственным несовпадением наиболее сильных проявлений коровой и мантийной сейсмичности: коровая сосредоточена в наклоненных на юг зонах активных разломов северного фланга Памира, а мантийная приурочена к крутопадающей Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоне, расположенной на 100—200 км южнее. Между этими разобщенными сейсмофокальными зонами на глубине около 30 км залегает слой с повышенной концентрацией очагов землетрясений⁶. Вероятно, по этому слою продолжается относительное движение верхнекоровых масс и вдоль него или несколько ниже выделяются коровые волноводы. Подобная обо-

⁵ Feng R., McEvilly T. V. Interpretation of seismic reflecting profiling data for the structure of the San Andreas fault zone // Bull. Seismol. Soc. America. 1983. V. 73. N 6. P. 1701—1720.

⁶ Белоусов В. В., Беляевский Н. А., Борисов А. А. и др. Строение литосферы по профилю глубинного сейсмического зондирования Тянь-Шань — Памир — Каракорум — Гималаи // Сов. геология. 1979. № 1. С. 11—27.

собленность верхнекорковых структур выявлена сейсмическими наблюдениями и южнее, в Гималаях.

Анализируя графики повторяемости землетрясений, Г. А. Востриков исследовал физические свойства верхней мантии Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоны и обнаружил в ней значительные вертикальные вариации эффективной вязкости, действующих напряжений и скорости сейсмической деформации⁸. А. В. Николаев и И. А. Санина проанализировали время прохождения сейсмических волн от близких землетрясений к системе станций в Средней Азии и выявили в верхней мантии Памира и Гиндукуша существенные скоростные неоднородности, как вертикальные, так и горизонтальные⁹. Это дает основание полагать, что современные тектонические перемещения в верхней мантии региона не менее, а может быть более дифференцированы, чем в земной коре. И в коре, и в верхней части мантии обособляются пластины и линзы горных пород с разным стилем деформаций, между которыми находятся «астенослои», имеющие пониженную эффективную вязкость и высокий градиент тектонических движений.

Распределение движений во времени

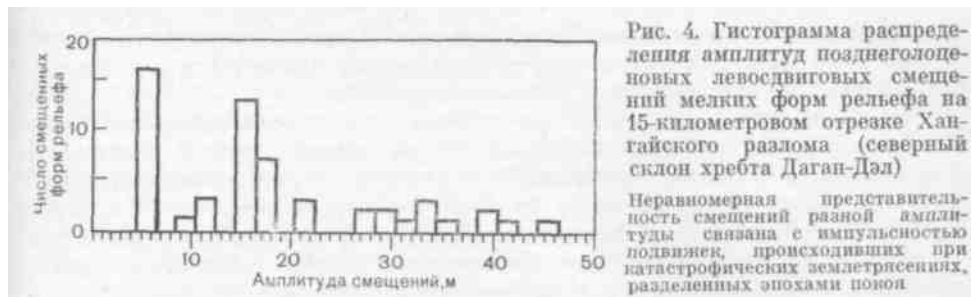
Оценивая скорости тектонических движений геологического прошлого, будь то интенсивность прогибания, определяемая по мощностям отложений, или некий структурообразующий процесс, начало и конец которого датируется определениями возраста горных пород, мы всегда имеем дело с усредненными характеристиками. Но понимание механизма структурообразования зависит в числе прочих показателей и от того, происходит ли процесс плавно или импульсно, циклично или направленно. Изучение современных движений инструментальными методами отчасти дает ответы на эти вопросы. Оно показывает, что движения могут быть импульсными при катастрофических землетрясениях или медленными и плавными (криповыми). В последнем случае их скорость все же не остается постоянной: она возрастает перед и после землетрясений. Местами установлено сочетание криповых движений и с сильными землетрясениями.

Поскольку особенно сильные землетрясения (магнитуда не менее 7,5) обычно происходят в одном и том же месте с интервалами в сотни лет, короткого периода инструментальных наблюдений, в большинстве районов не превышающего ста лет, недостаточно для определения режима современных движений в активной зоне. Необходимо привлекать исторические, археологические и геолого-геоморфологические данные, характеризующие длительные отрезки голоцена. К сожалению, морфологические особенности голоценового разрыва или структуры иного типа, как правило, не позволяют определить, созданы эти структуры импульсными или криповыми движениями. Для решения вопроса требуется исследовать режим движений по разрыву. Известно, что при длительном плавном движении будут более или менее равномерно представлены смещения разной величины, а при повторяющихся импульсных движениях — лишь дискретные величины смещений.

⁷ Matthews D., Him A. Crustal thickening in Himalayas and Caledonides//Nature. 1984. V. 308. P. 497—498.

⁸ Трифонов В. Г., Макаров В. И., Востриков Г. А. Структурно-динамическая расчлененность литосферы неотектонических подвижных поясов//XXVII Международный геологический конгресс. Доклады. Т. 3. М.: Наука, 1984. С. 105—117.

⁹ Николаев А. В., Санина И. А. Метод и результаты сейсмического просвечивания литосферы Тяш.-Шаня и Памира//Докл. АН СССР. 1982. Т. 264. № 1. С. 69—72.



Указанный способ определения режима движений по разлому был применен к Хангайскому левому сдвигу в Северной Монголии, вдоль которого выявлены следы длительных, по меньшей мере в течение всего четвертичного периода, горизонтальных движений¹⁰. На выбранном достаточно протяженном участке разлома измерялись все сдвиговые смещения русел, бортов мелких долин и других молодых форм рельефа. Поскольку большинство мелких водотоков, возникающих на склоне в какой-то интервал времени, позднее уничтожается эрозией, сменяется новыми водотоками и лишь немногие из них, углубляясь и расширяясь, превращаются в крупные овраги, самых «молодых» малоамплитудных смещений водотоков оказалось больше, чем крупных и «старых» (рис. 4). При сопоставлении числа водотоков и других форм, сдвинутых на те или иные расстояния, выявились максимумы, то есть часто повторяющиеся смещения определенной амплитуды.

Наименьший по амплитуде максимум смещений — 5—6 м — достоверно возник при катастрофическом землетрясении 1905 г. Очевидно, и другие максимумы представляют собой суммы подвижки 1905 г. со смещениями, случившимися при подобных более древних сейсмических катастрофах. Каждый больший по амплитуде максимум отличается от меньшего на 5—6 м, то есть именно на такую величину прирастало суммарное смещение при очередном сейсмическом импульсе. Следовательно, геологические последствия повторяющихся сильных землетрясений были примерно одинаковыми.

Для определения сроков повторяемости импульсов было использовано то обстоятельство, что на отдельных участках Хангайский разлом отклоняется от генерального широтного направления на северо-восток. На таких участках при общем левом сдвиге по разлому происходит растяжение, реализующееся в образовании уступов и провалов. Они подпруживали долины и создавали замкнутые котловины, заполнявшиеся водой. Эти небольшие озера углублялись при очередном импульсе движений, и в них отлагались осадки озерно-болотного типа, тогда как в промежутках между импульсами они засыпались обломочным материалом со склонов или заполнялись речными наносами. Определяя радиоуглеродным методом начало формирования какого-либо слоя озерно-болотных отложений в разрезе впадины, мы по существу датировали момент времени, непосредственно следовавший за сейсмическим импульсом. Путем таких определений в отдельных впадинах и их корреляции по всей зоне Хаигайского разлома удалось выделить в течение последних 4,5 тыс. лет семь импульсов движений, то есть катастрофических землетрясений типа Хаигайского 1905 г., происходивших через 600 ± 300 лет.

Подобная импульсность движений выявлена и для других крупных активных сдвигов Монголии — Кобдинского и Долиноозерского, а также для

¹⁰ Корреляция тектонических событий новейшего этапа развития Земли. М.: Наука, 1985.

отдельных отрезков разлома Сан-Андреас и Таласо-Ферганского разлома Тянь-Шаня. В промежутках между импульсами проявления движений и сейсмичность у этих разломов чрезвычайно слабы.

Примерно такой же режим голоценового тектонического развития характерен для Северо-Анатолийской системы правых сдвигов с той лишь разницей, что импульс движений, которому предшествовала длительная эпоха покоя, оказался растянутым на несколько десятилетий. Он реализовался не одним, а серией сильных землетрясений, как бы прокатившихся по всей системе разломов и приведших к суммарному горизонтальному сдвигу на 4 м при вертикальной подвижке до 1 м.

Для островных дуг характерен иной, импульсно-криповый режим современных движений. Катастрофические землетрясения с магнитудами не менее 7,5 повторяются здесь в одних и тех же местах через 100—200 лет, а в промежутках между ними происходят более слабые землетрясения и крип¹¹. Интенсивность их нарастает по мере приближения срока главного землетрясения и убывает после него.

Собственно криповый режим отличается преобладанием медленных движений, сочетающихся с очень частыми слабыми землетрясениями и регулярно повторяющимися землетрясениями средней силы. Такой режим зарегистрирован, например, на северном фланге Памира и на двух участках зоны разлома Сан-Андреас.

Импульсный режим присущ областям с развитой континентальной корой, а импульсно-криповый — областям с корой переходного типа от океанической к континентальной. Криповый режим выявлен в активных зонах континентов, сложенных рыхлыми, пластичными или сильно раздробленными породами, не способными выдерживать значительную концентрацию тектонических напряжений. Таким образом, знание режима голоценовых движений позволяет в определенной мере прогнозировать физические свойства горных пород в недрах земной коры активных областей.

Голоценовая тектоника и сильные землетрясения

При проектировании большинства инженерных сооружений и системы землепользования особенно важно учитывать опасность сильных землетрясений. Практически все они приурочены к активным зонам. Однако из-за различий в режимах голоценовых движений не все активные зоны и не в одинаковой мере сейсмоопасны. Иначе говоря, голоценовая активность — обязательный, но недостаточный признак мест возможных сильных землетрясений.

Вопрос о том, какие активные зоны или их участки могут генерировать сильные землетрясения, решается по-разному. В. П. Солоненко предложил путь решения, основанный на изучении палеосейсмодислокаций — голоценовых структурных форм, сходных с теми, что возникают при современных сильных землетрясениях, и указывающих, таким образом, на возможность подобных катастроф в исследуемом участке активной зоны. Этот путь хорош тем, что позволяет оценивать силу сотрясаемости и среднюю повторяемость землетрясений. Трудом В. П. Солоненко и его коллег для юга Сибири, В. К. Кучая и А. А. Никонова для Средней Азии достигнут большой прогресс в изучении палеосейсмодислокаций, которые

¹¹ Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121—150.

созданы действием ударной волны и нарушением гравитационного равновесия при сильных землетрясениях. Однако оценки сейсмической опасности территории могут быть получены и при исследовании палеодислокаций иного рода — смещений по самим активным разломам. Таким способом для южной части Таласо-Ферганского активного сдвига в Тянь-Шане выявлена возможность возникновения землетрясений с магнитудой 8, повторяющихся примерно через 700—800 лет. Отметим, что описанный способ обнаружения мест возможных сильных землетрясений ограничен степенью сохранности следов древних сейсмических катастроф.

Другой путь оценки сейсмического риска дает не столь достоверные результаты, но может использоваться повсеместно. Он основан на выявлении геологических условий для более или менее длительной концентрации тектонических напряжений в большом объеме горных пород и их последующей быстрой разрядки. Так, присутствие в активной зоне пластичных и рыхлых пород уменьшает возможность концентрации напряжений, тогда как в гранитах, гнейсах, вулканических породах, прочных разновидностях песчаников и известняков такая возможность возрастает. На концентрацию напряжений влияет также степень раздробленности пород, которую, как и их вещественный состав, можно определить методом геологического картирования.

Имеет значение и характер голоценовых движений. В сдвиговых и сбросово-раздвиговых активных зонах очаги сильных землетрясений обычно располагаются на главных разломах или непосредственно возле них, в активных зонах сжатия они чаще приурочены к второстепенным нарушениям или напряженным участкам земной коры перед фронтом крупного надвига.

Концентрации напряжений способствуют тектоническая расслоенность активной зоны и развитие на глубине голоценовых структур, морфология и кинематика которых отличаются от структур приповерхностного слоя земной коры. Как показал В. И. Макаров, особенно опасны в таких случаях субгоризонтальные поверхности срыва между по-разному деформируемыми слоями земной коры и участки сочленения в них разнонаправленных структур, активных на разных глубинах.

Выявление геологических условий для концентрации напряжений в активной зоне представляет собой генетический путь определения опасности сильных землетрясений.

Современное тектоническое развитие литосферы

Анализ наиболее активных проявлений голоценовой тектоники обнаружил преобладание горизонтальных перемещений над вертикальными. Смещения по разломам и складчатые деформации взаимосвязаны в пределах крупных регионов и отражают общую направленность горизонтальных тектонических движений. Эту черту современного тектогенеза можно объяснить лишь с позиций мобилизма.

Среди мобилистических тектонических концепций наиболее разработана и пользуется признанием теория тектоники литосферных плит, рассматривающая тектогенез как результат взаимодействия жестких литосферных плит, перемещающихся по астеносфере или вместе с ней. Результаты изучения голоценовой тектоники континентов, согласуясь с этой теорией в первом приближении, заставляют вместе с тем пересмотреть некоторые ее положения.

Во-первых, голоценовые деформации и смещения охватывают не только пограничные межплитные зоны, а широкие подвижные пояса на ок-

раинных частях плит. Так, в области сближения Индостанской и Евразийской плит зоны интенсивных голоценовых деформаций на каждой из плит имеют ширину в сотни километров. Кинематика многочисленных разнонаправленных активных разломов, сочетающихся со складчатыми деформациями чехла и фундамента, лишь весьма приближенно может быть рассчитана как результат взаимодействия жестких плит и микроплит. Правильнее и точнее считать эти смещения проявлениями деформации литосферных масс, а сами плиты — деформируемыми объектами.

Во-вторых, горные массы в активных областях на разных глубинах деформируются по-разному и, вероятно, перемещаются с разными скоростями. На это указывают выявленные различия в расположении и морфологии структур, наиболее активных на разных глубинах. Блоки и пластины с разным стилем нарушений разделяются линзами, субгоризонтальными и наклонными зонами высоких градиентов скоростей тектонических движений. В такой тектонической расслоенности важную роль играет изменение физических свойств пород земной коры с глубиной. В верхней части континентальной коры активных областей преобладают крутопадающие разломы со сдвиговыми перемещениями. Нарушения других кинематических типов имеют подчиненное, локальное распространение. Значительный, если не ведущий, вклад в суммарное движение дают импульсные подвижки при сильных землетрясениях. Ниже 20—30 км число очагов сильных землетрясений резко уменьшается (рис. 5). Это обстоятельство, а также изучение горных пород, выведенных на земную поверхность из нижних горизонтов коры последующими перемещениями и эрозией, приводят к выводу о возрастающей в недрах континентальной коры роли объемного разрушения и пластического течения материала. В основании хрупкодеформируемых верхнекоровых масс выделяются коровью волноводы¹². С приближением к ним выполаживаются крутопадающие разломы верхнекорового слоя¹³.

Значительные вариации скоростей сейсмических волн, вертикальную изменчивость напряженного состояния, сейсмической вязкости, скорости сейсмической деформации можно предполагать и в сейсмически активных объемах верхней мантии. Вероятно, тектоническое расслоение и дифференцированные по глубинам перемещения и деформации, устанавливаемые в земной коре современных подвижных поясов, в такой же, если не в большей, мере свойственны и породам верхов мантии. В итоге движения мантийных горных масс передаются в верхние горизонты коры и отражаются на земной поверхности весьма опосредованно.

Пространственные закономерности проявлений голоценовой тектоники согласуются с теми тектоническими гипотезами, в основе которых лежат представления о конвекции мантийного вещества. Можно принять, что поднимающиеся легкие и легкоплавкие продукты его дифференциации в верхах мантии распространяются в стороны, вызывая раздвигание океанической коры и ее обогащение продуктами глубинной дифференциации. Области концентрации восходящего мантийного потока, расположенные под современными рифтовыми системами, характеризуются пониженными скоростями сейсмических волн до глубин 150—200 км¹⁴.

¹² Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. М.: Наука, 1980.

¹³ Шаров В. И., Гречишников Г. А. О поведении тектонических разрывов на различных глубинных уровнях земной коры по данным метода отраженных волн (МОВ) // Докл. АН СССР. 1982. Т. 263. № 2. С. 412—416.

¹⁴ Андерсон Д. Л., Дзевонский А. М. Сейсмическая томография // В мире науки. 1984. № 12. С. 16-25.

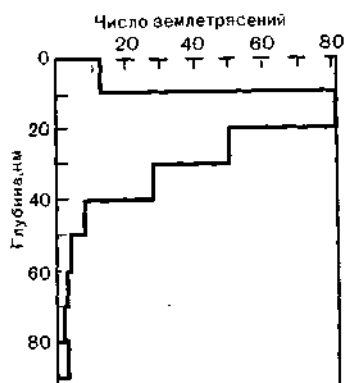


Рис. 5. Гистограмма распределения по глубинам до 90 км очагов внутриконтинентальных землетрясений с магнитудой не менее 6 на территории СССР и сопредельных стран (данные «Нового каталога сильных землетрясений на территории СССР». М.: Наука, 1977)

Если раздвигание океанической литосферы от рифтовых зон сейчас общепризнано, то вопрос о локализации нисходящей ветви мантийного потока остается дискуссионным. Традиционная тектоника плит решает его, погружая океаническую плиту на активной окраине континента или одну из плит в области внутриматериковой коллизии. Анализ голоценовой тектоники показывает, что дело обстоит сложнее. В областях сближения континентальных масс (например, Тянь-Шаньско-Памиро-Гималайской) тектоническое расслоение и дифференцированное перемещение разноглубинных объемов горных пород вызывает их неравномерное скучивание. В итоге возрастает мощность коровых (до 70—80 км) и мантийных литосферных масс. Не исключено их частичное перемешивание и, соответственно, некоторое разуплотнение мантии. Образование мантийной сейсмофокальной зоны может отчасти объясняться скучиванием холодных литосферных масс, способных к хрупкому разрушению. Но ведущую сейсмогенерирующую роль, особенно на больших глубинах, играют, как представляется, концентрация напряжений и связанное с ней

возрастание скорости тектонических деформаций по сравнению с деформациями верхнекорового слоя, рассеянными на большой площади.

Уходящая на сотни километров в глубину сейсмофокальная зона — важнейший структурный элемент островных дуг и активных континентальных окраин. Вдоль нее происходит погружение холодной и поэтому относительно хрупкой океанической литосферы под континентальную. На глубинах до 200 км погружающиеся массы испытывают вещественные преобразования и частичное плавление, продукты которого в значительной мере выводятся наверх в зонах активного вулканизма и вовлекаются в дальнейшие перемещения литосферы. На тектоно-магматическую переработку погружающихся масс указывают геохимические и петрологические особенности вулканизма островных дуг и активных континентальных окраин, а также пониженные скорости сейсмических волн, зарегистрированные под некоторыми дугами на глубинах до 150—200 км. Противоречивы данные о том, в какой мере остаточные продукты переработки погружающейся океанической литосферы сохраняют свою обособленность глубже 200 км. Соответственно, проблематична и природа землетрясений па больших глубинах, тем более что сейсмофокальная зона становится здесь прерывистой: скопления очагов сильных землетрясений чередуются с асейсмичными интервалами. Различия механизмов очагов землетрясений на разных глубинах сейсмофокальной зоны¹⁵ свидетельствуют о том, что глубокофокусные землетрясения могут иметь и иную причину, нежели сопровождаемое разрушением погружение холодной океанической литосферы.

Приведенные факты ставят под сомнение важный тезис тектоники литосферных плит, согласно которому наращивание литосферы в океанах полностью компенсируется ее погружением на активных окраинах кон-

¹⁵ Балакина Л. М. Землетрясения Тихого океана (пространственное расположение и процессы в очагах) // Геотектоника. 1983. № 5. С. 20—37.

тинентов, в областях островных дуг и внутриконтинентальной коллизии. Вместе с тем под земной корой некоторых островных дуг, например Курило-Камчатской и Японской, обнаружены субгоризонтальные зоны скопления очагов землетрясений. Исходя из предварительного анализа графиков повторяемости землетрясений, Г. А. Востриков наметил в верхней части Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны участки, на которых концентрируются напряжения и возрастает скорость сейсмической деформации. Одни из них ориентированы в направлении погружения сейсмофокальной зоны, другие наклонены к ней полого или почти горизонтальны. Возможно, под островной дугой наряду с погружением горных масс океанической литосферы вдоль сейсмофокальной зоны происходит их пологое пододвигание под островную дугу и край континента. Такое пологое пододвигание допустимо и на некоторых пассивных континентальных окраинах, где нет сейсмофокальной зоны, например на северном побережье Индийского океана. Скорости сближения с Евразией северной части этого океана выше, чем континентальных масс Аравии и Индостана, а поскольку океанические массы перемещаются быстрее, они могут пододвигаться под Аравию и Индостан.

Все это приводит нас к предположению, что часть океанической литосферы (преимущественно мантийные породы, так как земная кора в океанах весьма маломощна) пододвигается под континенты, сжимая и утолщая мантийные образования континентальной литосферы. С таким предположением согласуются повышенные скорости сейсмических волн, характерные, согласно данным Д. Л. Андерсона и А. М. Дзевонского, для верхней мантии континентов до глубин в сотни километров. Косвенным отражением того же процесса может быть сжатие континентальной коры, проявленное в описанных выше особенностях кинематики активных разломов и в обобщенных членом-корреспондентом АН СССР П. И. Кропоткиным результатах измерений современного напряженного состояния горных пород. Нижние горизонты утолщенной континентальной литосферы могут отторгаться от нее и вовлекаться в глубинные движения мантийных масс, что в сочетании с погружением океанической литосферы на активных окраинах континентов компенсирует ее наращивание в океанических рифтовых зонах.

Выявленные тенденции современного тектонического развития литосферы присущи всему новейшему этапу эволюции Земли, охватывающему последние 10—12 млн. лет и отличающемуся от более ранних этапов мезозоя и кайнозоя высоким стоянием континентов, широким распространением гор и повышенной контрастностью вертикальных тектонических движений. Сравнение скоростей раздвигания океанов в разные эпохи мезозоя и кайнозоя показывает, что аномальность новейшего этапа не обусловлена общим возрастанием скоростей горизонтальных движений. Причины аномальности кроются скорее в возрастании суммарной эффективной вязкости или уменьшении степени физической расслоенностиTM литосферы, что связано с повышенными теплотермиями при интенсивном вулканизме. Это не позволяет в полной мере распространять закономерности современного тектонического развития литосферы на более ранние стадии ее эволюции. Но такие черты, как тектоническая расслоенность, деформируемость литосферных пластин и блоков в процессе перемещений, важная роль, наряду с медленными движениями, импульсных подвижек континентальной коры, общая направленность движения литосферных масс от океанов под континенты, проявлялись в прошлом не менее широко, чем в течение новейшего этапа и его последней стадии — голоцена.